

УДК 662.7

РАЗЛОЖЕНИЕ ВОДЫ УГЛЕРОДОМ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Канд. техн. наук, доц. НАЗАРОВ Н. С., инж. ОЛЕВАНОВ А. Ю.

*Белорусский национальный технический университет,
Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси*

Использование в энергетике водорода, производимого из воды, – одно из перспективных направлений технического прогресса. Это направление привлекательно тем, что запасы воды практически не ограничены. В настоящее время промышленное производство водорода и водородсодержащих продуктов в основном осуществляется путем паровой конверсии природного газа или метана. Отделение водорода от углерода в метане осуществляется водяным паром с использованием теплоты при температурах 1000–1100 К в химических паровых реакторах. При этом для осуществления эндотермических реакций сжигается дополнительно около половины исходного газа. С целью экономии природного газа исследуется много комбинаций химических реакций, в которых расщепляется не природный газ, а вода.

Разложение воды углеродом твердого топлива – один из способов получения газовой смеси с высоким содержанием водорода. Чтобы разложить воду, необходимо разорвать химическую связь водорода с кислородом. Это очень энергоемкий процесс. Так как в подобных процессах стремятся использовать ядерную энергию, появилось отдельное направление исследований – атомно-водородная энергетика.

Факт получения горючего газа разложением водяного пара раскаленным углем открыл итальянский ученый профессор Фелиций Фонтана [1], предложивший периодический способ разложения водяного пара раскаленным углем. Процесс разложения состоял из двух периодов: «горячего» и «холодного» дутья. В период «горячего» дутья в шахтную печь интенсивно вдувался воздух, и, сгорая, топливо в ней разогревалось до «белокалильного жара». «Горячий» период заканчивался прекращением воздушного дутья. Начинался «холодный» период вдуванием одного водяного пара. В этот период, по сути дела период разложения водяного пара

углеродом топлива, протекали эндотермические реакции за счет теплоты, накопленной в топливе в первом периоде. Температура в газогенераторе падала, процесс замедлялся вплоть до прекращения, приходилось снова разогревать топливо и начинать первый период и т. д.

В середине прошлого столетия в установках по газификации твердых топлив стали частично использовать водяной пар [2]. Смешанное паровоздушное или парокислородное дутье при газификации твердых топлив позволяет использовать «избыточную» теплоту, получаемую при газификации твердых топлив при его неполном сгорании для разложения водяного пара углеродом топлива.

Более качественный газогенераторный газ и меньшие затраты на очистку от азота воздуха получаются при парокислородном дутье. Однако при этом существенно дорожает конечный продукт, ибо в технологический процесс включается кислородная установка.

Газификация твердого топлива одним водяным паром осуществлялась в промышленности до последнего времени только периодическим способом. За весьма длительный промежуток времени (более 200 лет) техники различных стран использовали современную аппаратуру и приборы [3], а сущность способа оставалась неизменной.

В [4] предложен непрерывный способ разложения водяного пара углеродом твердого топлива. Газогенераторы, работающие по этому способу, должны состоять из двух частей [5]: 1) парогенератора высокотемпературного водяного пара низкого, близкого к атмосферному давления; 2) реактора. По [4–5] разработан, спроектирован и изготовлен на Минском заводе технологических металлоконструкций исследовательский газогенератор (рис. 1) и в лаборатории рациональной энергетики ИТМО НАН Беларуси оборудован экспериментальный стенд

для изучения процесса водоугольной газификации (ВУГ).

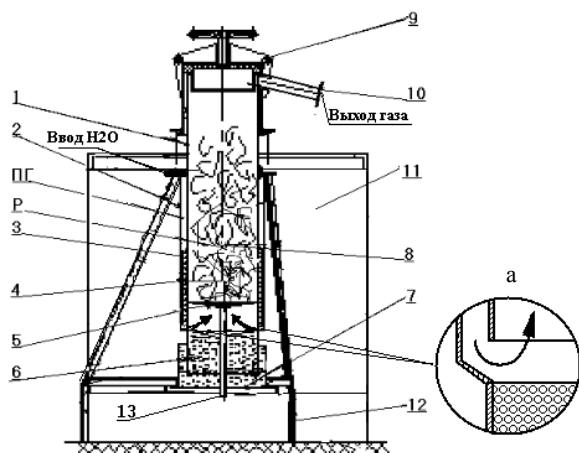


Рис. 1. Общий вид исследовательского газогенератора: 1 – конусная шахта реактора; 2 – наружный цилиндр парогенератора; 3 – электрическая спираль; 4 – реактивная зона; 5 – колошниковая решетка; 6 – песчаный затвор; 7 – нижний люк; 8 – топливо; 9 – верхний люк; 10 – патрубок; 11 – теплоизоляционный кожух; 12 – тренога; 13 – термомонопары; а – место входа пара в реакторную зону из пароперегревателя

В газогенераторе названные выше части можно выделить условно. Конструктивно они совмещены. Совмещение выполнено с целью исключения потерь теплоты при передаче перегретого пара из парогенератора в реактор и разогреве конструкции до температур газификации в период пуска.

Парогенератор ПГ (рис. 1) охватывает реактор Р снаружи. Он выполнен в виде кольцевого зазора между шахтой 1 реактора и наружным цилиндром 2 парогенератора. Перегрев водяного пара до высокой температуры при давлении, близком к атмосферному, осуществляется электрической спиралью 3, расположенной в кольцевом зазоре. Перегрев пара электрическим током выбран в исследовательском газогенераторе с целью точного и удобного контроля расходуемой энергии. В принципе, перегрев пара может осуществляться любым источником.

Электрическая спираль изготовлена из нихромовой проволоки диаметром 0,8 мм и в фарфоровых бусах, намотана по наружной поверхности конусной шахты. Общее сопротивление спирали постоянному току составляет 24 Ома. Электрическая спираль нагревает конструкцию шахты реактора и прилегающие к ее внутренним стенкам слои топлива. Такое ус-

тройство нагревателя позволяет снизить перерасход перегретого пара, необходимый при раздельном исполнении парогенератора и реактора, для разогрева конструкции в начальный период (период запуска) и в процессе газификации. При такой конструкции перегретый водяной пар является «донором» теплоты для эндотермических реакций газификации.

Шахта реактора изготовлена (сварена) в виде усеченного конуса из листовой стали толщиной 1,5 мм. Внутренний диаметр нижнего основания конуса – 120 мм, верхнего – 100 мм, высота – 600 мм.

Водяной пар движется в кольцевом зазоре сверху вниз, омывая электрическую спираль. Испарение воды может быть как в самом парогенераторе (кольцевом зазоре), так и вне его. В первом случае вода тонкой струйкой подается в кольцевой зазор на верхнюю, разогретую металлическую часть шахты (ввод H_2O) так, чтобы она не попадала на фарфоровые изоляторы. Во втором случае от внешнего испарителя (Исп) (рис. 2) через тот же штуцер подается пар. Второй вариант более надежный.

Температура перегрева пара зависит от скорости подачи воды и электрической мощности, подаваемой на спираль испарителя и пароперегревателя и измеряется хромель-алюмелевой термопарой 12. Нагрев спирали регулируется регулятором мощности РМ.

Снизу кольцевой зазор парогенератора свободно соединен с нижним основанием шахты реактора, и перегретый водяной пар, как показано стрелками на рис. 1, через колошниковую решетку 5 проходит в нижнюю часть (реактивную зону) 4 газогенератора. Он равномерно по сечению шахты продувается через топливо. Величина давления пара под решеткой определяется гидравлическим сопротивлением слоя топлива продувке.

Продукты газификации (генераторный газ) из реактивной зоны реактора поднимаются вверх по шахте, подогревают топливо, а сами охлаждаются до контролируемой температуры, выбираемой не ниже температуры конденсации водяных паров. Давление пара под колошниковой решеткой и температура отходящих газов также зависят от толщины засыпанного слоя топлива.

Зола отработанного топлива через колосниковую решетку просыпается вниз на песчаный

затвор 6. По мере накопления золы в затворе она периодически удаляется через нижний люк 7. Песчаный затвор закрывает доступ перегретого водяного пара в атмосферу.

Топливо 8, в качестве которого используется древесный уголь или каменноугольный кокс, периодически, по мере расходования, загружается в шахту через верхний люк 9. Газогенераторный газ отводится из верхней части шахты через патрубок 10. Снаружи газогенератор имеет теплоизоляционный кожух 11. Для удобства проведения работ вся конструкция газогенератора смонтирована на треноге 12.

На экспериментальном стенде в исследованиях совместно с газогенератором применялись вспомогательные устройства и приборы. Схема измерения параметров газификации представлена на рис. 2. Расход воды, подаваемой в парогенератор от водопроводной сети через жидкостный ротаметр РМ 064, изменялся в пределах 0–1,8 л/ч. Перед экспериментами ротаметр калибровался. Скорость подачи воды изменялась вентилем 2 ротаметра. В случае использования

испарителя от ротаметра вода подавалась через него (показано штриховой линией), а без испарителя – прямо в парогенератор.

Из газогенератора газ подавался в холодильник (конденсатор) 5, охлаждаемый проточной водой. Конденсированная влага собирается в мерный стакан 6. После конденсации влаги генераторный газ перед ротаметром Р-4Г частично подавался в отборник 8 анализатора водорода АВП-02Г. Для определения объемной концентрации остальных газов отбирались пробы газа, анализ которых проводился на хроматографе.

На рис. 3 приведена одна из первых диаграмм, записанных самописцем прибора ПСД-4. На прибор подавался сигнал от термопары, установленной под колошниковой решеткой, т. е. измерялась температура перегретого водяного пара до входа в реактивную зону. Установка включалась на сетевое напряжение 220 В. Электрический ток записывался амперметром и был равен 300 мА. Он оставался практически постоянным в процессе всего эксперимента.

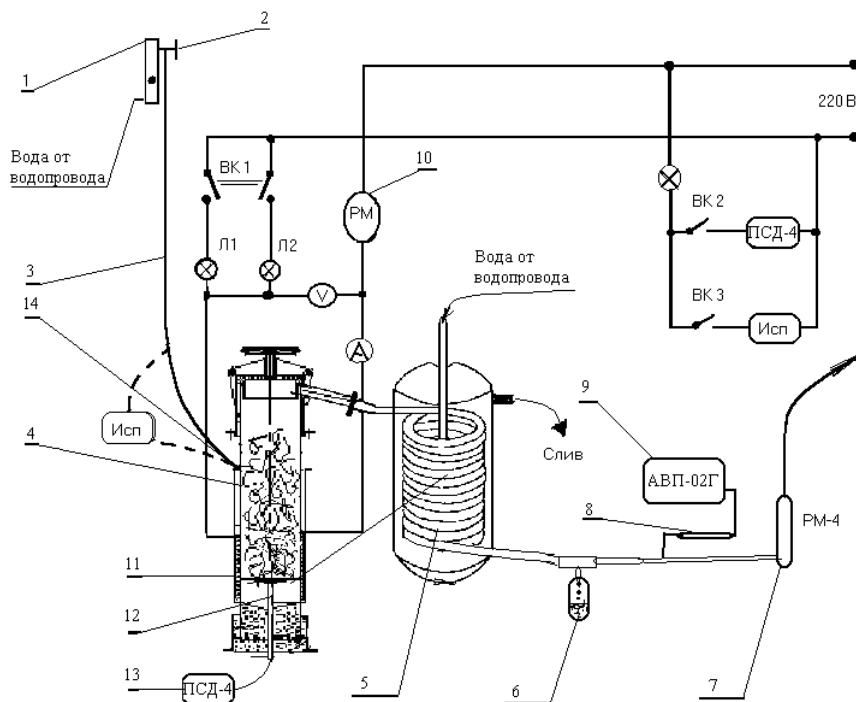


Рис. 2. Принципиальная схема измерений параметров ВУГ: 1 – ротаметр типа РМ 064; 2 – регулятор (вентиль ротаметра) скорости подачи воды; 3 – питающая трубка парогенератора; 4 – газогенератор; 5 – охлаждающий змеевик; 6 – отстойник конденсата; 7 – газовый ротаметр типа Р-4; 8 – отборник газоанализатора; 9 – анализатор водорода АВП-02Г; 10 – регулятор электрической мощности РМ; 11 – электрическая спираль пароперегревателя; 12 – хромель-алюмелевые термопары; 13 – самопишущий 12-канальный прибор ПСД-4; 14 – штуцер входа пара в пароперегреватель

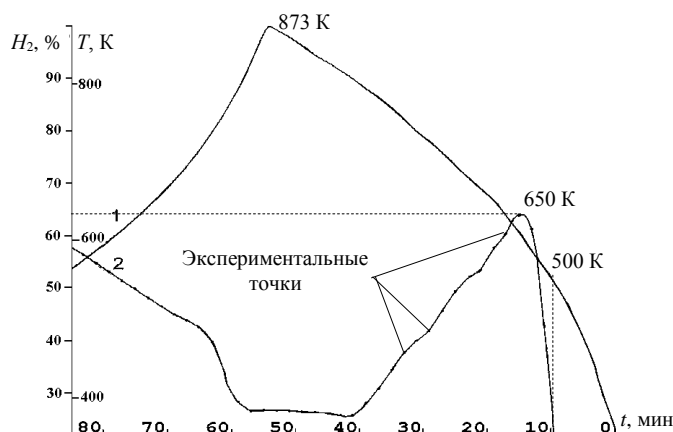


Рис. 3. 1 – $T = f(t)$ – функция температуры от времени; 2 – $H_2 = f(t)$ – функция концентрации водорода от времени. Интервал протоколирования содержания водорода (экспериментальные точки) – 2 мин

Кривая $T = f(t)$ на подъеме описывает разогрев установки. На спуске – охлаждение. Время t на диаграмме течет справа налево по оси абсцисс. Цена одного деления – 10 мин. По оси ординат измерялась температура. Верхняя точка перегиба кривой $T = f(t)$ равна 873 К.

На диаграмму температуры на рис. 3 нанесены показания содержания водорода в газогенераторном газе, записанные анализатором водорода АВП-02Г. Они выражены в процентах к общему объему сухого (после конденсации влаги) газа. Следует отметить, что полученные на экспериментальном стенде результаты новы и неожиданны, ибо при предварительном теоретическом исследовании процесса [6] получены зависимости, не совпадающие с экспериментальными.

По результатам первых экспериментальных исследований можно сказать, что водоугольная газификация начинается при температурах 480–500 К, и уже при 630–650 К процесс идет достаточно активно, что значительно ниже температур 1000–1100 К [3]. Такая разница в температурах становится понятной при более внимательном анализе имеющихся сведений. Так,

в [3] температура 1100 °С – это температура раскаленного угля, а температура же водяного пара – 165–170 °С. Даже без учета теплоемкостей реагентов (воды и углерода) среднеарифметическая температура процесса будет значительно ниже. Точка перегиба кривой $H_2 = f(t)$ свидетельствует о том, что в районе экстремума полученных температур изменяется характер ВУГ.

ВЫВОДЫ

1. Запущен в эксплуатацию экспериментальный стенд для исследования ВУГ.
2. Первые экспериментальные результаты свидетельствуют о сложности процесса ВУГ и не могут быть объяснены по существующим представлениям.
3. Для понимания и практического применения способа необходимо провести дальнейшие всесторонние совместные теоретические и экспериментальные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ламанский, С. И. О нефтяном, каменноугольном и водяном газе / С. И. Ламанский. – СПб., 1887
2. Газификация твердых топлив: тр. III науч.-техн. конф. – М., 1957.
3. Шорин, А. П. Автоматическое управление газогенераторами водяного газа и водорода / А. П. Шорин // Центральный бюллетень технической информации. – М., 1958.
4. Способ получения смеси водорода и угарного газа и парогенератор для получения высокотемпературного водяного пара: пат. 6476 ВУ; опубл. 30.09.04 // Бюл. изобр. – 2004. – № 3.
5. Киселев, Л. И. Разработка конструкции исследовательского водородуглеродного газогенератора / Л. И. Киселев, Т. М. Тавловская, Н. С. Назаров // Сб. докл. 59-й науч.-техн. конф. БНТУ. – Минск, 2006.
6. Назаров, Н. С. Расчет полноты реакций и превращения веществ при водоугольной газификации / Н. С. Назаров, И. Н. Назаров // Вестник БНТУ. – 2007. – № 4.

Поступила 10.01.2007